Rev.Acad.Canar.Cienc., IX (Núms. 2,3 y 4), 9-16 (1997)

Algunas consideraciones formales sobre la estructura, la función y el tiempo en modelos retinales.

Alemán-Flores, M.; Quesada-Arencibia, F.A.; Díaz-Urrestarazu,A.;Moreno-Díaz (jr), R.

Centro Internacional de Investigación en Ciencias de la Computación
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
CIICC-Campus de Tafira, Edf. de Informática y Matemáticas
35017 Las Palmas
{miguel,alex,roberto}@grumpy.dis.ulpgc.es; adiaz@ccdis.dis.ulpgc.es

ABSTRACT

Following the idea that structure and function in neurons and nets are perfectly linked and sometimes cannot be dissociated, this paper explores the effect of introducing time in nets that were designed to mimic some functional spatial properties of retinal tissues based on a microprocessal structure called dendritic computational structure. As a result, new architectural restrictions arise to cope with problems like consistency of representation and completeness, that is, preservation of information, an apparent requisit of foveal processing.
Keywords: neural nets, completeness, temporal consistency, retinal model, Newton Filters.

RESUMEN

Siguiendo la idea de que la estructura y la función están indivisiblemente unidos en neuronas y redes neuronales naturales, en concreto en las retinas de vertebrados superiores, este trabajo explora el efecto de introducir el tiempo en redes artificiales que han sido pensadas para duplicar ciertas propiedades espaciales del tejido retinal y basadas en microestructuras de proceso (que llamaremos estructuras computacionales dendríticas). Como resultado, aparecen nuevas restricciones en la conectividad de las neuronas de la red para poder atacar los problemas de la consistencia de la representación que del mundo exterior llega a zonas más centrales del sistema nervioso y del mantenimiento de la información (complitud en el sentido formal matemático), que son aparentemente requisitos del proceso de información que tiene lugar en la fóvea.
Palabras clave: redes neuronales, complitud, consistencia temporal, modelos retinales, Filtros de Newton.

1.- La función.

Nos centraremos en la función en un sentido doble dependiendo de si hablamos de neuronas simples o de redes de neuronas. En primer lugar, la palabra "función" se entenderá

como el proceso de cómputo de una neurona, en el sentido de "operación que se lleva a cabo sobre los datos que caen sobre el campo receptivo de una célula". El resultado de dicha operación es llamado "descriptor" y en algunos casos una sola neurona puede ser capaz de calcular más de un descriptor sobre sus datos de entrada. En nuestro modelo, y en ese caso, se necesitará una unidad de control externo a la célula. Por otro lado, la palabra "función" se aplicará a una característica u objetivo que ha de ser realizado o conseguido por la red, por ejemplo, que la transformación sobre los datos de entrada sea completa (lo que equivale a decir que no existe pérdida de datos y que el espacio de las entradas puede ser recuperado punto a punto si es necesario). Así, "función" desde este segundo punto de vista estará más cerca de lo que Luria llama "un sistema funcional completo" {1} incorporando muchas microoperaciones que pertenecen a niveles diferentes de proceso.

La funcionalidad espacial de las células ganglionares ha sido ampliamente explorada desde los años cincuenta en miles de experimentos. El clásico patrón de pesos en forma de sombrero mejicano (mexican-hat shape) que parece ser soportado por su campo dendrítico ha sido modelado, también, a través de los más diversos procedimientos siendo el más conocido la diferencia de dos gausianas (DOG) {2}. Nosotros hemos basado la modelización a partir de la duplicación aproximada de una arquitectura dada, vagamente inspirada en la conectividad dendrítica presente en algunas células retinales (Figura 1) y a continuación explorando sus propiedades matemáticas, encontrando que el análisis en funciones de Hermite proporciona herramientas más precisas y mejores resultados cuando se usa para replicar el comportamiento espacial de las células ganglionares {3,4} y para diseñar sus contrapartidas artificiales de utilidad en proceso de imagen. Esto es, no se necesitan diferencias de gausianas para justificar las funciones de pesos, sino que es la propia estructura formada por microprocesadores idénticos distribuidos en capas con los mismos pesos la que genera la distribución de una forma natural con la única restricción de que dos de dichas capas sean inhibidoras (matemáticamente, que sus pesos sean negativos). A este tipo de máquinas de cómputo discreto parecidas a neuronas se les denominó Filtros de Newton {4}, y como queda apuntado, generan funcionales de Hermite tras ser formuladas en el continuo.

En relación a estas células, su función espacial puede ser descrita, en lenguaje natural, como detectoras de contraste, y en términos matemáticos como unidades para el cómputo de una operación de tipo convolutorio, en algunos casos incluso producto matricial. Para mantener un mínimo parecido con la estructura que se presenta naturalmente en las primaveras capas de proceso visual en vertebrados, estas unidades de cómputo se colocarán formando capas de procesadores que actúan sobre los datos de entrada que suponemos será una imagen o la

representación de una imagen tras ser muestreada por la capa de fotorreceptores. visto como un todo, y pasando al segundo significado de la palabra "función", el objetivo de este sistema funcional completo es proveer a la siguiente capa de células con una descripción coherente del mundo exterior, evitando la pérdida de información. Matemáticamente es equivalente a ejecutar una transformación que posea inversa.

2.- La estructura que incorpora a la función.

De la Figura 1 puede observarse que nuestra máquina neuronal se construye a base de situar capas de microprocesadores que ejecutan operaciones simples, las más simples de las cuales pueden ser una suma o una resta dependiendo del sigo (+ o -) que afecta al peso (siempre del mismo valor absoluto (1) de cada conexión. Suponemos que cada unidad microprocesadora es equivalente a un contacto sináptico y que en su versión bidimensional tiene cuatro entradas. Esta estructura ha sido previamente desarrollada en parte y estudiadas sus propiedades matemáticas {3,5}, y como sumario de las mismas es posible afirmar que:

1.- Dado un número de capas de procesos aditivos (es decir, pesos +1) y diferenciadores (pesos -1), éstas se pueden colocar a voluntad sin que cambie el comportamiento de la máquina: la función general de la máquina neuronal es invariante frente a cambios estructurales de dicha naturaleza.

2.- Cambiando la naturaleza de las capas de forma ordenada por medio de una unidad de control externa es posible generar, sin cambiar de estructura computacional, tantos funcionales diferentes como datos de entrada existan en el campo receptivo de la máquina neuronal. La forma de operar se basa en cambiar ordenadamente el signo de cada conexión de + a - o viceversa. Por ejemplo, una célula de este tipo con un campo receptivo rectangular de dimensiones mxm es capaz de computar mxm descriptores diferentes y linealmente independientes unos de otros.

También se ha mostrado que las propiedades funcionales de estas máquinas (esto es, los núcleos de computación que son versiones discretas de funcionales de Hermite, generados por la combinación de procesos suma y diferencia) son una consecuencia directa de la estructura de la máquina neuronal (una cascada de microprocesos ordenada en capas) y en este sentido estructura y función son mutuamente dependientes en nuestro modelo.

3.- El flujo del tiempo.

Supongamos que tenemos una arquitectura basada en los bloques mostrados en la Figura 1, tal y como muestra la Figura 2, con células (o máquinas neuronales) cuyos campos receptivos son todos del mismo tamaño, un cuadrado de dimensiones mxm, y que el diseño incluye la unidad de control externa mencionada anteriormente y que cambia los signos ordenadamente, de forma que para computar cada descriptor se necesitan τ unidades de tiempo. Para conseguir el objetivo de obtener una descripción completa (es decir, que se realice una transformación con inversa) de los datos de entrada, ésta, la entrada, debe permanecer sin cambios por al menos $m^2 \tau$ unidades de tiempo. Esto se muestra en la Figura 3, y de forma más general en la Figura 4.

Un registro intermedio de datos es emplazado tras la capa de receptores para introducir un retardo en la flujo de señales con el objeto de "dar tiempo" a la capa de procesadores de la máquina neuronal a calcular todos los descriptores necesarios. A su vez, este registro envía a la siguiente capa una versión de la imagen de entrada dividida en el tiempo de forma que para cada imagen son enviados $m^2 \tau$ mensajes por cada máquina neuronal.

De esta estructura hay que resaltar dos puntos importantes:

Primero, cuando los datos de entrada cambian más rápidamente que la escala de tiempo fijada para el funcionamiento de los procesadores, gobernada por la unidad de control externa, se pierde la capacidad de recuperar de forma fiable los datos de entrada (Figuras 4 y 5).

Segundo, cuando se combinan máquinas neuronales con campos receptivos de distinto tamaño, los datos son transmitidos en instantes diferentes dando una representación inconsistente de la entrada. Es necesario, pues, en este caso, que las señales de células (máquinas neuronales) de mayor campo receptivo sean transmitidas más rápidamente que las de menor campo receptivo.

4.- Implicaciones en Teoría Retinal. Conclusiones.

En la exploración y modelización o formalización matemática de los mecanismos que subyacen en el proceso de información visual en los seres vivos es posible encontrar herramientas de cómputo y estructuras novedosas cuyas características permiten, de manera

razonable, hacer suposiciones sobre la funcionalidad del "procesador natural". En lo desarrollado anteriormente se comprueba que, si imponemos la restricción fuerte de la complitud (es decir, que el sistema visual no pierda ni un bit de la información que le llega) el tipo de interrelación que debe existir entre la estructura, la función y el funcionamiento temporal del sistema es, también, muy restrictiva, en el sentido de que modificar una característica de la estructura (el tamaño del campo receptivo o el número de capas de la máquina neuronal, p.e.) implica modificar la escala de tiempos y la funcionalidad. Por otro lado, es de resaltar que algunas de las características necesarias para que el sistema artificial transmita información coherente del mundo exterior se comprueba existen en los sistemas naturales: existen diferentes velocidades de transmisión de información en neuronas diferentes, y dicha velocidad está ligada al tamaño del campo receptivo {6}.

Referencias.

{1} Luria, A.R. (1973), "The working brain", Penguin Books, London.

{2} Marr,D. (1980), "Vision", WH Freeman and Co. New York.

{3} Moreno-Díaz jr. R. (1993) "Computación paralela y distribuida: relaciones estructura-función en retinas", Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

{4} Moreno-Díaz jr, R. Leibovic, K.N., Bolívar Toledo, O. (1994) "Preservation of information in retinal systems", Cybernetics and Systems, World Pub. Co, Singapur, Vol 1, pp731-736.

{5} Moreno-Díaz, R. Garcés-Guevara, S., Moreno-Díaz jr, R. (1996) "Newton Tranforms: new tools for CAST and Image Processing", Cybernetics and Sytems, Num 27, pp441-447.

{6} Lettvin J, Maturana H, McCulloch W, Pitts, W. (1953) "What the frog's eye tells the frog's brain" en "Embodiments of Mind", The MIT Press, Cambridge, Mass, USA.

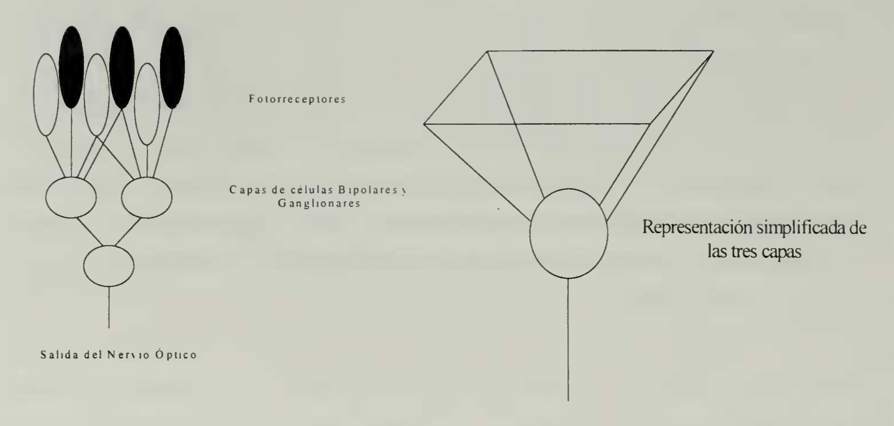


Figura 1: Estructura computacional detallada, en la que cada círculo representa una unidad microcomputacional (una conexión dendrítica), haciendo algunas operaciones sencillas. A la derecha, la versión más simple que comprende esa estructura.

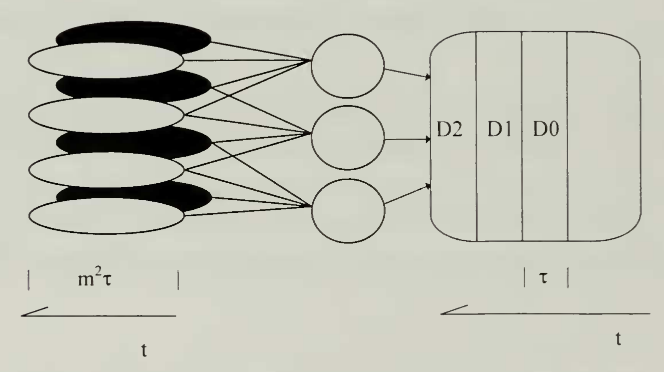


Figura 2: Máquinas Neuronales que comprenden las unidades microcomputacionales completas, computando tres descriptores y que necesitan que los datos de entrada se mantengan tres unidades de tiempo para ser estables. La unidad de control externa no está dibujada por simplicidad.

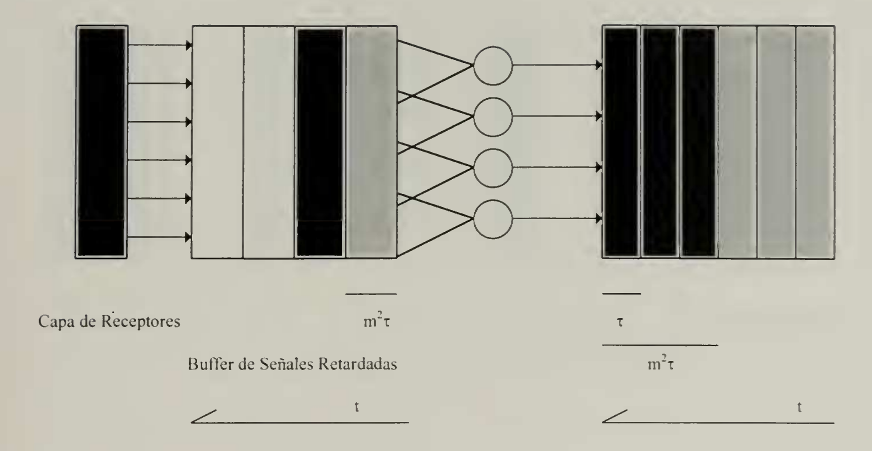


Figura 3: Una estructura general para computar en el tiempo una transformación completa sobre una imagen dada incidiendo en la capa de fotorreceptores. El color codifica los datos concernientes a la misma imagen de entrada (por ejemplo, los mensajes de negro en el tercer bloque están relacionados con la banda negra del segundo, e igualmente con las bandas de rayas verticales). El buffer se necesita cuando se asume que los receptores trabajan más rápido que la máquina neuronal. Tenemos que recordar que el prerrequisito de todo el sistema es ser completo en el sentido matemático.

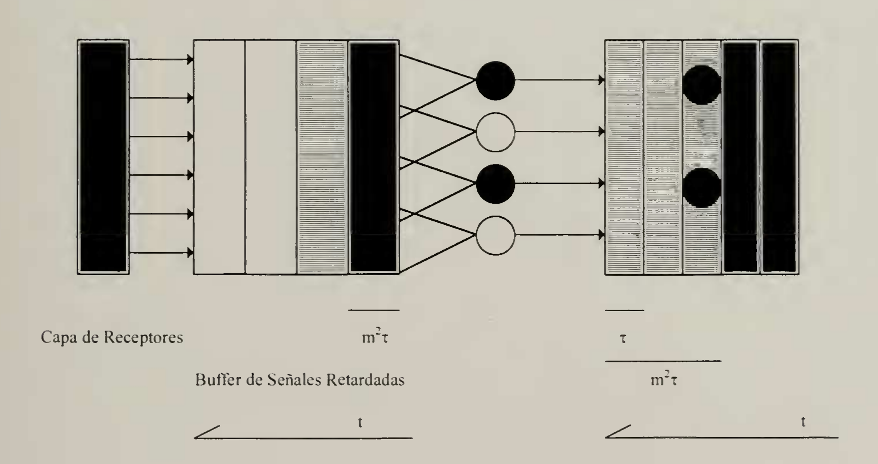


Figura 4: Las células marcadas en negro tienen campos receptivos mayores y transmiten datos procesados con un desplazamiento en el tiempo. Estas células necesitarían una velocidad de transmisión mayor para evitar una representación inconsistente del espacio marcado en negro.

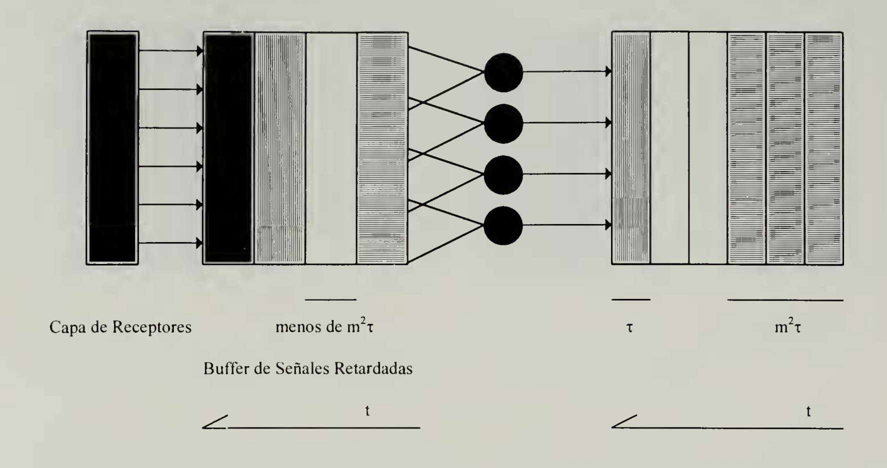


Figura 5: Si el espacio marcado en blanco permanece menos tiempo del necesario las máquinas neuronales envían una representación incompleta: se necesitan tres conjuntos de descriptores para recuperar el espacio marcado en blanco y sólo se envían dos. Hay datos que se pierden.